

Die Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit und Lochleibungsfestigkeit im Holznagelbau

Mlynek, Franz

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 6, 1954,
S. 255-271



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Die Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit und Lochleibungsfestigkeit im Holznagelbau

Von Franz Mlynek

Mit 15 Abbildungen

Vorgelegt von Herrn W. Stoy

Summary: In the case of a statical wooden-nail-connection the nails stress the wood within the nail-whole on ultimate embedding stress.

In the essay in question is has been examined as to which connections do exist in respect of the several sorts of wood, inclusive ply-wood, when being loaded by round nails between the prism-proof and ultimate embedding stress.

Please find annexed an extract of a Finnish publication which deals with this question limited to Finnish pine-wood when being loaded by quadratic nails.

Übersicht: In einer statisch belasteten Holznagelverbindung beanspruchen die Nägel das Holz im Nagelloch auf Lochleibungsdruck.

In der vorliegenden Abhandlung wird untersucht, welche Beziehungen bestehen bei den verschiedenen Holzarten, einschließlich Sperrholz, bei Belastung durch runde Nägel zwischen der Prismenfestigkeit und Lochleibungsfestigkeit.

Im Anhang wird auszugsweise eine finnische Veröffentlichung gebracht, die diese Frage unter Beschränkung auf finnisches Kiefernholz bei Belastung durch quadratische Nägel untersucht.

1. Einleitung

Der Nagel kann als eines der ältesten und zugleich volkstümlichsten Holzverbindungs mittel angesehen werden. Von den Wikingern, denen er im Bootsbau zur Verbindung von Planken und Spanten diente, über Philibert de l'Orme mit seinen freitragenden Bindern aus kurzen, dünnen Brettern in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts, David Gilly (um 1800), Emy (etwa 1850) und Meltzer (um 1900) ist die Verwendung von Nägeln als Holzverbinder zu verfolgen bis in die heutige Zeit.

In systematisch aufgebauten Versuchen hat Stoy die wissenschaftliche Grundlage für die Beurteilung der Tragfähigkeit von Holznagelverbindungen geschaffen.

2. Derzeitiger Stand im Holznagelbau

2.1 DIN 1052, Holzbauwerke, Berechnung und Ausführung

Durch DIN 1052 fand der Holznagelbau seine Anerkennung als vollwertige Konstruktion. Damit wurde der Bereich des ingenieurmäßigen Holzbaues durch ein sehr entwicklungsfähiges Gebiet erweitert. Diese Anerkennung war der positive Arbeitserfolg jahrelanger, intensiver Forschung auf dem Gebiet der Holznagelverbindungen.

Durch Versuche auf breitester Basis wurde die Tragfähigkeit der Holznagelverbindungen, sei es einschnittig oder zweisechnittig, für die verschiedenen Nageldurchmesser in Verbindung mit verschiedenen Brettstärken festgestellt.

Die Ergebnisse der Auswertung dieser Versuche bringt die in DIN 1052 angeführte Tabelle für die zulässige Belastung der Nagelverbindung entsprechend der einzelnen Nageldurchmesser mit den jeweils zugehörigen Brettdicken. Hierbei handelt es sich um die Auswertung von Versuchen, bei denen die durch Nagelung angeschlossenen Bretter durch eine Druckkraft belastet wurden.

Die zulässige Tragkraft der Nagelverbindung wurde festgelegt mit:

$$\text{a) } P_{\text{zul}} = \frac{P_{\text{Bruch}}}{3} < P_{1,5}$$

$$\text{b) } P_{\text{zul}} = P_{1,5} < \frac{P_{\text{Bruch}}}{3},$$

wobei man unter P_{Bruch} die von der jeweilig untersuchten Verbindung erreichte Höchstlast versteht, und $P_{1,5}$ die aufnehmbare Kraft bei 1,5 mm Verschiebung der Hölzer untereinander.

Die vorerst ablehnende Einstellung der Fachwelt gegenüber dem Holznagelbau wandelte sich sehr schnell ins Gegenteil, und in sehr kurzer Zeit hatte der ingenieurmäßige Holznagelbau seine Position als neue Konstruktionsart eingenommen. Die Weiterentwicklung und Verbesserung des Holznagelbaues ist eine vornehme Aufgabe der Wissenschaft.

In diesem Bestreben knüpften Gaber [8], Fonrobert [5, 6, 7], Grabbe [11], Seitz [26] und Marten [16] an die bereits gewonnenen Erkenntnisse an und wirkten an der weiteren wissenschaftlichen Erforschung der Holznagelverbindungen mit. Als neue Veröffentlichungen sind die von Johansen [13] und Möller [19] anzuführen. Als jüngster wissenschaftlicher Beitrag ist die Arbeit von Dr.-Ing. Adolf Meyer [17] anzusprechen, die eine Zusammenfassung der derzeitigen Erkenntnisse darstellt.

Zweifellos haben sich die in DIN 1052 festgelegten zulässigen Belastungen für Holznagelverbindungen gut bewährt, was als Maßstab für die Gründlichkeit der vorausgehenden Untersuchung gewertet werden kann. Sie entsprechen jedoch nicht der jüngsten Entwicklung im Holznagelbau.

Diese Entwicklung zielt darauf hin, einen Holznagelbau mit hochwertigen Baustoffen zu entwickeln. Die DIN 1052 beschränken sich in ihren Angaben auf die zulässige Tragkraft der Nägel bei ausschließlicher Verwendung von Nadelholz (was als Weichholz bezeichnet werden kann) mit einer Holzdruckfestigkeit von 400 bis 600 kg/cm² (feucht bzw. trocken) und Stahlnägeln mit einer Stahlzugfestigkeit von 60 bis 70 kg/mm². Für andere Holznagelverbindungen, sei es bei Verwendung von Hölzern mit großer Festigkeit oder von Nägeln mit Festigkeiten von 80 bis 190 kg/cm², können aus DIN 1052 keine Angaben entnommen werden.

Bei der fortschreitenden Entwicklung und Verbesserung der für den Holznagelbau erforderlichen und zur Verfügung stehenden Konstruktionsmittel muß sich die vorhandene Lücke besonders nachteilig bemerkbar machen, wenn ein Baustoff mit höherer Festigkeit verwendet wird. Dieser Zustand bedarf dringend einer Abhilfe, da der Holznagelbau sonst mit der allgemeinen technischen Entwicklung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Vervollkommnung nicht Schritt halten kann.

Die sich langsam einstellende kritische Situation wurde von den an der Holzforschung maßgeblich beteiligten Kreisen erkannt. Unter der Obhut von Stoy [27] wurden im Rahmen einer Dissertation Untersuchungen auf diesem Gebiet durchgeführt.

2.2 Neuere Versuche

In einer Versuchsreihe untersuchte Mlynek [18] erstmalig das Verhalten von Holznagelverbindungen bei Verwendung von hochwertigem Stahl mit 17facher Festigkeitsabstufung von 34,4 bis 185,3 kg/mm² und verschiedenen Holzarten wie Fichte, Buche, Eiche, Buchensperrholz, Australisch Blackbutt und Afrikanisch Bongossi. Die hierbei ermittelten Höchstlasten sind auszugsweise für die Nagelfestigkeiten $\sigma_B = 69,90$ bis 179,90 kg/mm² in Abb. 1 graphisch und in Tafel 1 tabellarisch wiedergegeben.

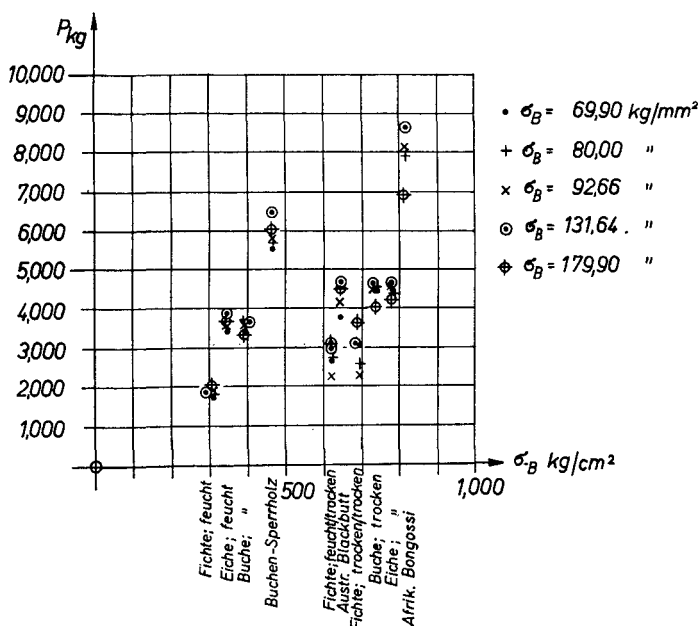


Abb. 1. Maximale Belastungen von zweischnittig genagelten Versuchskörpern

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse dieser Arbeit konnte im besonderen festgestellt werden, daß hinsichtlich des verwendeten Holzes für die Beurteilung der zulässigen Tragfähigkeiten der Nägel nicht allein von der Druckfestigkeit des Holzes ausgegangen werden kann. Das wird bei der Betrachtung von Abb. 1 deutlich, wenn die ermittelten Höchstlasten P auf der Basis der Holzdruckfestigkeit σ_{-B} verglichen werden.

Bei der in der Abbildung angegebenen Höchstlast handelt es sich um die durch Druckversuche ermittelten max. Belastungen von zweischnittig genagelten Versuchskörpern nach Abb. 2, mit einer Holzstärke von 3×22 mm und je 10 Nägel 28/65, jeweils verschiedener Festigkeit je Versuchskörper.

Neben der Druckfestigkeit des Holzes muß seine Lochleibungsfestigkeit auf die Größe der Höchstlast maßgeblichen Einfluß haben. In diesem Zusammenhang sei im Rahmen dieses Aufsatzes auf die Frage näher eingegangen, welche Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit σ_B und Lochleibungsfestigkeit σ_L besteht.

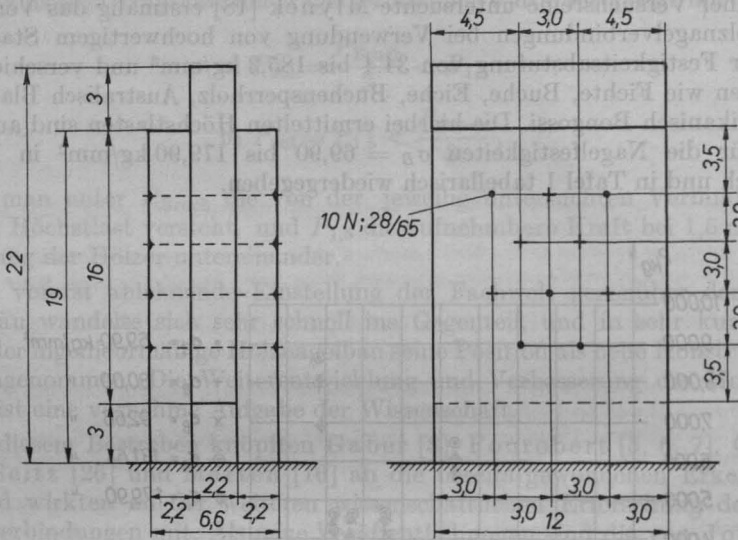


Abb. 2. Die verwendeten zweischnittigen Versuchskörper

3. Druckfestigkeit des Holzes

3.1 Allgemeines

Unter σ_B versteht man die Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser, also die max. Kraft (auf die Einheit des cm^2), welche die Zerstörung, d. h. den Bruch, des Holzgefüges herbeiführt. Da Holz ein natürlich gewachsener Baustoff ist, kann seine Festigkeit nicht vorher bestimmt werden, wie das bei Stahl der Fall ist. Die Festigkeit des Stahles kann mit mathematischer Genauigkeit gewissermaßen schon in der Retorte festgelegt werden, bevor überhaupt die Materie Stahl vorliegt.

Sämtliche Untersuchungen über die physikalischen Eigenschaften des gewachsenen Holzes können erst nach ihrem Werden durchgeführt werden. In den deutschen DIN — DVM sind die Prüfverfahren genau angegeben, zur Bestimmung von 1. Druckfestigkeit, 2. Biegezugfestigkeit, 3. Zugfestigkeit, 4. Scherfestigkeit usw., mit insgesamt 9 verschiedenen Prüfverfahren. Eine große Zahl von Wissenschaftlern wie Kollmann [14], Monnin [20], Graf [9, 10], Bach [1], Janka [12] und viele andere haben sich der wissenschaftlichen Untersuchung der Materie Holz gewidmet in dem Bestreben, einen positiven Beitrag für die Beurteilung der Verwendungsmöglichkeit von Holz zu schaffen. Diesem Zweck dienen auch die im folgenden beschriebenen Untersuchungen.

Um bei diesen Versuchen ein etwas umfassendes Ergebnis zu erzielen, sind folgende Holzarten herangezogen worden:

- | | |
|---------------------|--|
| 1. Fichte (feucht) | 5. Buchensperrholz |
| 2. Fichte (trocken) | 6. Australisches Black-Butt (Eukalyptusholz) |
| 3. Buche | 7. Afrikanisches Bongossi |
| 4. Eiche | |

Für jedes Holz wurden 3 Druckproben durchgeführt, und zwar im Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Technischen Hochschule Braunschweig. Der Mittelwert aus den 3 Versuchen ist jeweils der weiteren Betrachtung zugrunde gelegt.

3.2 Betrachtungen über die Holzdruckfestigkeit

Fichtenholz mit seinen Jahresringen aus weillumigem Frühholz und hartem Spätholz hat nur eine bescheidene Druckfestigkeit aufzuweisen, weil bei der Druckbelastung die Hauptbelastung von der harten Querschnittsstütze aufgenommen wird und diese bei Steigerung der Last schließlich in die weichen Querschnittsteile ausweicht. Je geringer nun der Anteil an Frühholz ist, desto größer wird die Druckfestigkeit.

Den gleichen Aufbau zeigt Buche, jedoch mit dem Unterschied, daß die festen Querschnittsstützen aus Spätholz breiter sind und auch das Frühholz ein festes und dichtes Gefüge hat und somit dem Querschnitt eine annähernd gleichmäßige Festigkeit gibt.

Bei Eiche verschiebt sich der Gefügebau zugunsten der Breite der festen Querschnittsstützen, zwischen denen lediglich kapillar wirkende, dünne, poröse Ringschichten liegen, in denen der Saftstrom fließt. Eiche zeigt gegenüber Fichte einen umgekehrten Gefügebau, d. h. breite, harte Spätholz-

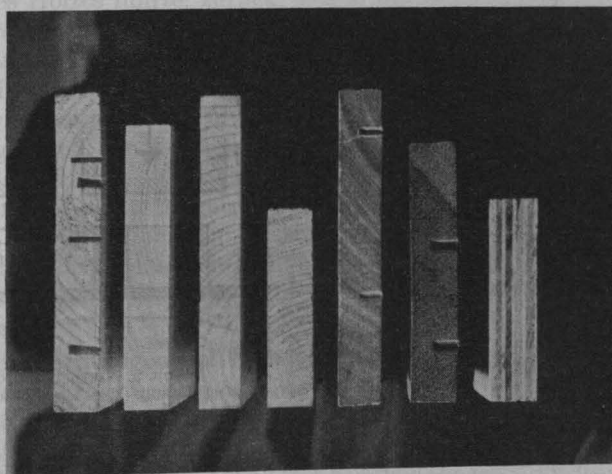


Abb. 3. Querschnittsaufbau der untersuchten Hölzer

Von links nach rechts:

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| 1. Fichte (schnell gewachsen) | 5. Australisches Blackbutt |
| 2. Fichte (langsam gewachsen) | 6. Afrikanisches Bongossi |
| 3. Buche | 7. Buchensperrholz (9lagig) |
| 4. Eiche | |

ringe und schmale, weichere Frühholzringe im Gegensatz zur Fichte mit dünnen, harten Spätholzringen und breiten, weicheren Frühholzringen.

In den Jahresringen der europäischen Hölzer spiegelt sich der Wachstumsrhythmus wider. Die untersuchten außereuropäischen Hölzer zeigen dagegen einen gleichmäßigeren Querschnittsaufbau. Eine Unterteilung in Früh- und Spätholz ist nicht mehr vorhanden, da der Baum kontinuierlich wächst und somit eine größere Festigkeit aufweist, weil das weiche, weitlumige Frühholz fehlt. Die Verschiedenheit des Gefügebauens spiegelt sich in Tafel 2 wider. Hier sind die ermittelten Druckfestigkeiten in Spalte 2 angegeben. In Abb. 3 kann man den Querschnittsaufbau der untersuchten Hölzer erkennen und daraus schon einen ungefähren Vergleich der Festigkeiten anstellen.

Neben diesen natürlich gewachsenen Hölzern wurde auch 9lagig geleimtes Buchensperholz untersucht. Durch die kreuzweise Verleimung der einzelnen Fournierlagen wird ein Ausweichen der harten Querschnittstütze in Richtung der geringen Festigkeit, d. h. ein Ausknicken in das weitlumige Holz hinein, verhindert. Die Holzfaser verspannt sich gegenseitig und weist dadurch in beiden Achsenrichtungen die gleiche Festigkeit auf. Hier zeigt es sich, daß durch einen einfachen Kunstgriff die Festigkeit der gleichen Materie wesentlich verbessert werden kann, indem man die Holzfaser wechselseitig um 90° verschwenkt und sie mit Hilfe von Leim wieder aneinander fügt.

3.3 Lochleibungsfestigkeit

Bei einer Holznagelverbindung wird die Kraft des einen Konstruktionsgliedes durch den Verformungswiderstand der Nägel in das andere Konstruktionsglied übertragen. Diese Kraftübertragung erfolgt über die Oberfläche des Nagels und geht als Lochleibungsdruck in das Holz (Abb. 4). Um

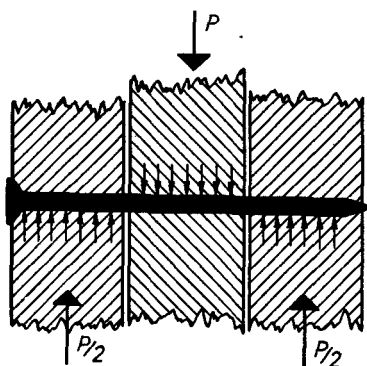


Abb. 4. Kraftfluß
in einer zweischnittigen Verbindung

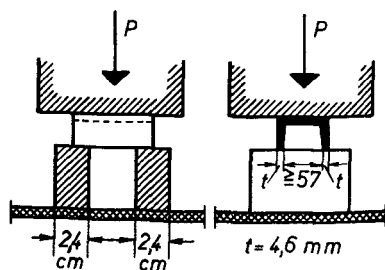


Abb. 5. Versuchsanordnung
zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit σ_L

die Möglichkeit der rechnerischen Bestimmung der Tragfähigkeit einer Holznagelverbindung beurteilen zu können, ist die Kenntnis der Lochleibungsfestigkeit und der daraus abgeleiteten zulässigen Lochleibungspressung entscheidend.

Es ist einleuchtend, daß zwischen der Druckfestigkeit σ_B des Holzes einerseits und der Lochleibungsfestigkeit σ_L andererseits ein Zusammenhang

bestehen muß. Jedoch ist es wichtig, das Verhältnis dieser beiden Holzfestigkeiten zu kennen, um für die Bestimmung der Nageltragkraft sofort mit der absoluten Druckfestigkeit σ_{-B} bzw. mit der zulässigen Druckspannung σ_b rechnen zu können.

Hinsichtlich der Lochleibungsfestigkeit sind bereits einige Arbeiten bekannt. Marten [16], Gaber [8], Johansen [13], Fahlbusch [4] und Möller [19] haben sich durch Versuche in verschiedenen Variationen mit der Lochleibungsfestigkeit beschäftigt. Um eine umfassende Klärung bemühte sich A. Meyer [17].

Der Rahmen dieser Arbeit soll sich jedoch nur auf die kurzgefaßte Feststellung der Abhängigkeit von Prismen-Druckfestigkeit σ_{-B} und der Lochleibungsfestigkeit σ_L beschränken. Die für diese Bestimmung gewählte Versuchsanordnung ist in Abb. 5 dargestellt. Die Schneide hat eine Breite von $t = 4,6$ mm, war halbrund abgearbeitet und entsprach in ihrer Form somit einem Nagel von 4,6 mm Durchmesser. Der Versuch wurde jeweils abgebrochen, wenn die Schneide 5 mm tief eingedrungen war. Bei dieser Eindrückung war durchweg ein Kraftanstieg nicht mehr zu verzeichnen.

Das Ergebnis der Versuche ist in Tafel 2 wiedergegeben, und zwar die ermittelte Lochleibungsfestigkeit in Spalte 3 und 4 und der Verhältniswert

$$\varphi = \frac{\sigma_L}{\sigma_{-B}} \text{ in Spalte 5 und 6.}$$

Zu den gemachten Versuchsbeobachtungen ist folgendes zu bemerken:

a) Bei dem untersuchten Kiefernholz mit Belastung parallel zur Faser stieg die Last bis zu einer Verschiebung von 2 mm (= max — Last) direkt proportional der Eindrücktiefe an. Bis etwa 4 mm Eindrückung blieb dann die Last konstant und ging anschließend bei weiterer Eindrückung, die zur Spaltung des Holzes führte, zurück. Durch die Eindrückung wurde die Holzfaser beiderseits glatt abgeschert. Bei der Untersuchung senkrecht zur Faser blieb die Lastzunahme konstant bis etwa 3 bis 4 mm Eindrückung. Im Gegensatz zur reinen Druckbeanspruchung des Holzes bei der Belastung parallel zur Faser wird bei der Belastung senkrecht zur Faser diese nicht allein durch Lochleibungsdruck, sondern auch auf Biegung beansprucht.

Durch die Eindrückung entstehen in der horizontal verlaufenden Faser Biegemomente, die zum Zugbruch der Faser führen können, wie aus Abb. 6 zu ersehen ist. Je größer der Festigkeitsunterschied zwischen dem harten Spätholz und dem weillumigen Frühholz ist, desto weitläufiger ist der Einfluß aus der auftretenden Biegespannung, erzeugt durch die Eindrückung senkrecht zur Faser.

b) Die Beobachtungen bei Eichenholz und auch bei Buche zeigten, daß bis etwa 2 mm Eindrückung der Lastanstieg proportional der Eindrückung verlief; anschließend setzte eine schwächere Steigung der Lastzunahme ein, die bei etwa 4 mm Eindrückung auslief. Danach war nur noch eine Eindrückung ohne Lastzunahme bei akuter Spaltgefahr feststellbar, die sich durch Knistern im Holz anzeigte.

c) Bei Blackbutt und Bongossi konnten ebenfalls gleiche Beobachtungen gemacht werden. Bis etwa 4,0 bis 4,5 mm Eindrückung ist zuerst ein etwas stärkerer und dann etwas langsamerer Lastanstieg zu beobachten. Das Holz

scherte beiderseitig der Schneide ab, drückte sich zusammen und quoll unterhalb der Schneide auf der Innenseite heraus, wie in Abb. 6 und 7 festzustellen ist. Bei der Untersuchung zeigte sich ferner, daß bei Beanspruchung parallel zur Faser bis etwa 5 mm Eindrückung kein Spalten eingetreten ist, auch wo sich eine gewisse Spaltgefahr durch starkes Knistern anzeigte, insbesondere bei rund 5 mm Eindrückung. Bei der Untersuchung senkrecht zur Faser

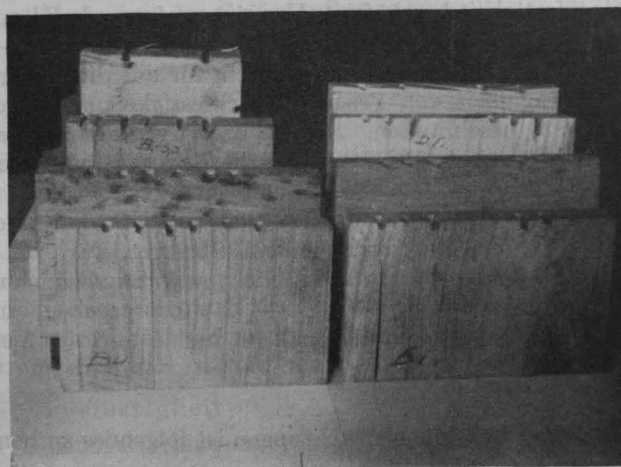


Abb. 6. Bild der Eindrückungen parallel zur Faser bei dem 1. und 3. Probekörper von vorn, senkrecht zur Faser (Zugbruch erkennbar) bei dem 2. und 4. Probekörper von vorn

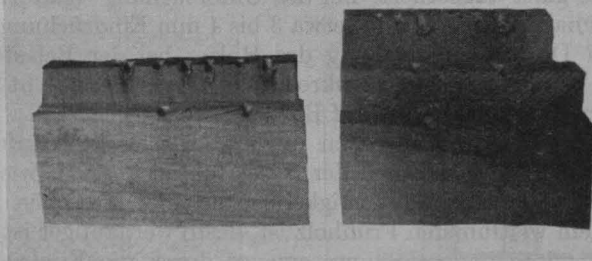


Abb. 7. Eindrückung bei australischem Blackbutt (links) und afrikanischem Bongossi (rechts)

1. Probekörper von vorn senkrecht zur Faser beansprucht
2. Probekörper von vorn parallel zur Faser beansprucht

splittert das Holz bereits bei 3,5 mm Eindrückung durch die auftretende Biegespannung der Längsfaser. In Abb. 7 sind die Auswirkungen der Beanspruchung in beiden Richtungen festzustellen. Die Lochleibungsfestigkeit ist also höher als die Druckfestigkeit, weil bei der Lochleibungsbeanspruchung das Holz gestützt wird, d. h. die Faser nicht ausweichen kann, ohne die Nachbarfaser zu beanspruchen. Je besser nun die Kontinuität des Baustoffes ist, desto größer muß auch die Wertdifferenz sein. Aus diesem Grunde ist

die Kenntnis des Gefügebaues des zu untersuchenden Holzes die Voraussetzung für eine richtige Beurteilung der Lochleibungsfestigkeit im Verhältnis zu der Druckfestigkeit.

d) Besonders aufschlußreich waren die Untersuchungen mit Buchensperrholz. Hierbei besteht überhaupt keine Spaltgefahr. Das Holz ist durch die Kreuzleimung gegenseitig gut abgestützt. Auch können die senkrecht zur Faser beanspruchten Lagen eine größere Biegebeanspruchung aufnehmen, da sie durch die Leimung im gewissen Sinne links und rechts der Schneide eingespannt sind.

Den Einfluß der Einspannung konnte man bei den Versuchskörpern ermessen, die senkrecht zur äußeren Faser beansprucht werden. Bei diesen Versuchskörpern schert die äußere Faser in der Leimfuge ab, und die Biegespannung bewirkt ein Aufspalten des Holzes senkrecht zur Krafrichtung. Dieser Vorgang läßt sich dadurch erklären, daß die äußere Faser nur einseitig gestützt wird und schließlich die Haftspannung in der Leimfuge überschritten wird. Durch diese gegenseitige Stützung des Holzes erklärt sich auch der unverhältnismäßig hohe Lochleibungswert des lagenweise verleimten Buchensperrholzes.

4. Vergleichende Betrachtung

Das rechnerische Ergebnis dieser Versuche ist insgesamt in Tafel 2 zusammengefaßt. In Spalte 5 ist der Wert φ angegeben, der als Maßstab für die Beurteilung dient, inwieweit die Lochleibungsfestigkeit σ_L größtmäßig von der Druckfestigkeit σ_B abweicht.

Bei Fichte ist kein Unterschied zwischen diesen beiden Festigkeiten zu verzeichnen. Je größer jedoch die Holzdichte und je fester sowie gleichmäßiger der Gefügebau wird, um so mehr verschiebt sich der Wert zugunsten der Lochleibungsfestigkeit σ_L .

Über die Ursache dieser Tatsache ist eingangs schon ausführlich gesprochen worden. Die Richtigkeit dieser Annahme bestätigt sich durch den Größenvergleich der φ -Werte mit

Fichte: $\varphi_{||} = 1,03$

Bongossi: $\varphi_{||} = 1,57$ mit Tendenz nach oben.

Interessant sind in Tafel 2 auch die Verhältniswerte φ_{\perp} . Sie bilden eine Beurteilungsgrundlage für die im Holznagelbau sehr oft auftretende Beanspruchungsart, z. B. bei Anschlüssen von Füllstäben an die Gurtungen.

Wie jedoch ein Vergleich der beiden φ -Werte erkennen läßt, ist der größtmäßige Unterschied nicht wesentlich. Bei Fichte ist $\varphi_{\perp} < \varphi_{||}$, während bei den Hölzern mit kontinuierlich dichtem Gefüge $\varphi_{\perp} > \varphi_{||}$ wird. Hinsichtlich der Lochleibungsverhältnisse können jedoch für beide Achsrichtungen die gleichen Verhältnisse vorausgesetzt werden.

Es ist sehr schwer, die wirkliche Lochleibungsbeanspruchung im Nagelloch wiederzugeben. Für die Verteilung der Lochleibungsbeanspruchung ist insbesondere die Lagerung des Nagels im Holz ausschlaggebend. Wird der Nagel ins Holz eingeschlagen, so liegen andere Verhältnisse vor, als wenn das Nagelloch teils oder voll vorgelocht ist. Es ist jedoch notwendig, für eine rechnerische Ermittlung der Tragkraft einer Nagelverbindung Annahmen zu treffen, die möglichst den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen.

Beim Eintreiben des Nagels wird die Holzfaser (je nach der Form der Nagelspitze) entweder zur Seite gedrückt oder durchgestanzt. Meistens tritt beides nebeneinander auf, und ein kleiner Spalttriß im Nagelloch ist nicht zu vermeiden, auch wenn dieser optisch nicht sofort festgestellt werden kann. Die seitlich gedrückten Fasern erzeugen einen Druck auf den Nagelschaft, wodurch zusätzlich eine Reibungskraft R neben der normalen Beanspruchung auf Lochleibung auftritt.

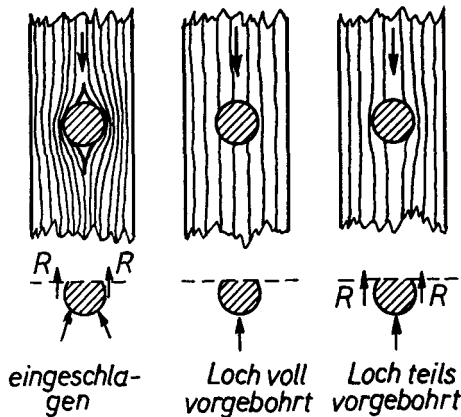


Abb. 8. Kraftübertragung im Nagelloch

In einem voll vorgebohrten Nagelloch liegt der Nagel satt auf der Holzfaser auf. Eine seitliche Reibungskraft tritt nicht auf, und die Lochleibung wird ausschließlich auf Druck beansprucht.

Bei einem teilweise vorgebohrten Loch treten beide Kraftübertragungen gemeinsam nebeneinander auf, und es überwiegt einmal diese oder jene, je nach Größe der Vorbohrung. Diese Möglichkeiten sind in Abb. 8 dargestellt.

Bei Überschreitung der aufnehmbaren Pressung im Nagelloch treten Brucherscheinungen auf, die je nach der Holzart verschieden sind. In Abb. 9 sind die Verschiebungsdiagramme der untersuchten Hölzer dargestellt.

Bei Fichte (a) dürfte es sich um einen ausgesprochenen Lochleibungsbruch handeln. Nach Überschreitung der zumutbaren Pressung wechselt das Material in den plastischen Bereich, ohne daß eine weitere Kraftaufnahme möglich ist.

Bei Eiche und Buche (b) tritt ein Formänderungsbruch auf. Bis zur zumutbaren Pressung verläuft die Verschiebung proportional der Spannung. Anschließend setzt eine Stauchung der Faser ein, und die Verschiebung wird immer stärker, bis der Lochgrund aufspaltet. Die Bruchlast ist dann gemäß Festlegung bei 5 mm Verschiebung abzulesen.

Bei australischem Blackbutt und afrikanischem Bongossi (c) tritt dagegen ein ausgesprochener Spaltbruch ein. Das Material nimmt die zumutbare Lochleibungspressung auf, bis zum Spaltbruch im Nagelloch durch die Schneidewirkung, vor Erreichen der 5 mm Eindrückung.

Bei dem untersuchten Buchensperrholz (d) dagegen dürfte es sich um einen Scherbruch handeln. Durch die gegenseitige Verspannung der Holzlagen ist ein durchgehendes Spalten nicht möglich, lediglich in den parallel

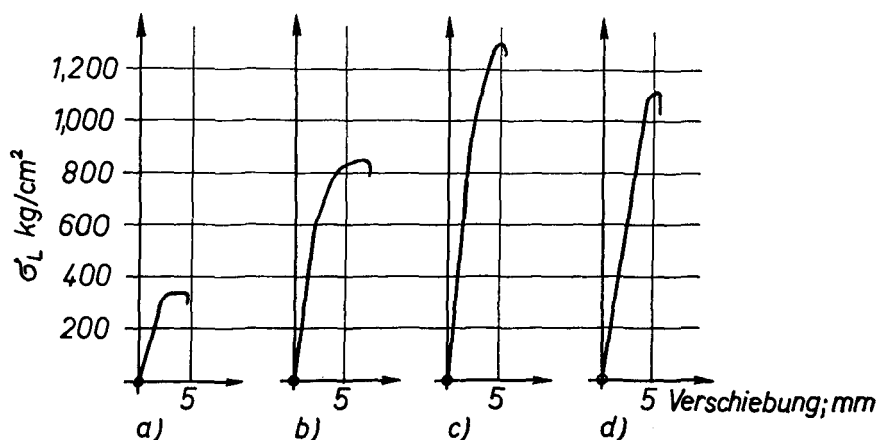


Abb. 9. Lochleibungsdruck und Eindringtiefe für

- | | |
|--------------------|---------------------------|
| a) Kiefer | c) Blackbutt und Bongossi |
| b) Eiche und Buche | d) Buchensperrholz |

beanspruchten Lagen, deren Holzfasern wiederum nur schwer ausweichen können, da sie senkrecht zum Spalt gehalten sind. Die Lastaufnahme geht proportional zur Verschiebung bis zum Scherbruch.

Zusammenfassung

Interessante Aufschlüsse gibt Abb. 1 in Verbindung mit Tafel 1. Hier sind die aus den Versuchen ermittelten Höchstlasten dargestellt, mit P als Ordinate und σ_{-B} als Abszisse, mit 5facher Variation der Nagelfestigkeit, von 69,90 bis 179,90 kg/mm², was einem Festigkeitsverhältnis von 2,6 entspricht. Jedoch sind die Nägel mit $\sigma_B = 179,90$ kg/mm² ohne Kopf ausgebildet.

Aus Tafel 2 geht deutlich der Einfluß des φ -Wertes hervor, wenn man die jeweils erreichte Höchstlast in Beziehung zur zugehörigen Holzfestigkeit setzt; z. B. erreicht Buchensperrholz mit $\sigma_{-B} = 440/480$ kg/cm² eine Höchstlast von 6000 kg ($\varphi_{||} = 2,40$) und Fichte trocken mit $\sigma_{-B} = 600$ kg/cm² eine Höchstlast von 3000 kg ($\varphi_{||} = 1,04$).

Bei Buche und Eiche sowie bei australischem Blackbutt sind die gleichen Beobachtungen zu machen, wenn auch nicht in so stark ausgeprägter Form. Dagegen sind bei afrikanischem Bongossi die Ergebnisse wiederum sehr geeignet, die vorherigen Ausführungen zu bestätigen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche und die hierbei gewonnenen Erkenntnisse zeigen, daß bei den in Mitteleuropa für Bauzwecke zur Verfügung stehenden Hölzern wie Fichte, Kiefer, Tanne, Lärche, Buche, Eiche,

u. U. Esche und Rüter die Lochleibungsfestigkeit σ_L gleich der Druckfestigkeit σ_{-B} gesetzt werden kann. Der hierbei in Kauf genommene Fehler ist so verschwindend gering, daß er bei den vorhandenen Wachstumsunregelmäßigkeiten des Holzes eine ganz untergeordnete Größe darstellt.

Je dichter und fester das Holzgefüge wird, sei es durch das kontinuierlich bedingte Wachstum tropischer Hölzer und durch künstliche Gefügeänderung,

wie bei Sperrhölzern, um so größer wird das Verhältnis $\frac{\sigma_L}{\sigma_{-B}}$.

Dieser Erkenntnis muß bei einer rechnerischen Bestimmung der Tragfähigkeit oder der zulässigen Tragkraft von Holznagelverbindungen Rechnung getragen werden.

Als neueste finnische Veröffentlichung auf diesem Gebiet sei auszugsweise wiedergegeben:

F. E. Siimes, P. E. Johanson, E. Niskamen:
Naulatiitostutkimuksia III, Helsinki 1954.

Untertitel:

Untersuchungen über die Lochleibungsfestigkeit und die Haftkraft von Nägeln der finnischen Kiefer (*Pinus Silvestris*).

Da die vorstehende Arbeit von Mlynek sich mit der Druckfestigkeit und Lochleibungsfestigkeit im Holznagelbau beschäftigt, sei hier nur das wesentlichste zum Thema gehörige über die Lochleibungsfestigkeit zusammenfassend dargestellt.

Die Versuche wurden teils als Promotionsarbeit von 2 Studenten im finnischen Institut für Technologie, Abt. Holz- und Papiertechnik, teils vom Holztechnischen Laboratorium der Staatlichen Technischen Versuchsanstalt durchgeführt.

Fast alle Versuche wurden mit glatten, kantigen (quadratischen) Nägeln ausgeführt, die in Finnland am meisten verwendet werden (21/50, 28/75, 42/125, 55/175). Das spezifische Gewicht gilt stets für 15% Feuchtigkeitsgehalt.

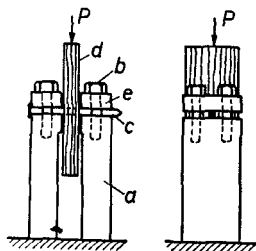


Abb. 10. Untersuchungsmethode zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit mittels eines durch das Holz geschlagenen Nagels

Die Lochleibungsfestigkeit im Holz wurde untersucht, wenn

- a) ein starres T-Profil und
- b) ein kantiger eingeschlagener Nagel

in das Holz eingedrückt war, und zwar

1. parallel zur Faser,
2. senkrecht der Faser,
3. unter einem Winkel von 45° zur Faser.

Hier sei nur die wichtigere Versuchsreihe b) betrachtet. Nur bei Beanspruchung parallel zur Faser ließ sich für 1,5 mm Verschiebung die Lochleibungsfestigkeit klar feststellen.

Um den tatsächlichen Verhältnissen bei Nagelverbindungen möglichst nahe zu kommen, wurde die Versuchsanordnung nach Abb. 10 angewendet. Hierbei wird ein Nagel durch ein Holzstück geschlagen und danach senkrecht zur Schaftrichtung gegen das Holz gedrückt. Der Druck parallel zur Faser ist am wichtigsten, da nur dieser Versuch Werte für die Lochleibungsfestigkeit liefert. Als Beispiel für diese Versuche ist Abb. 11 wiedergegeben.

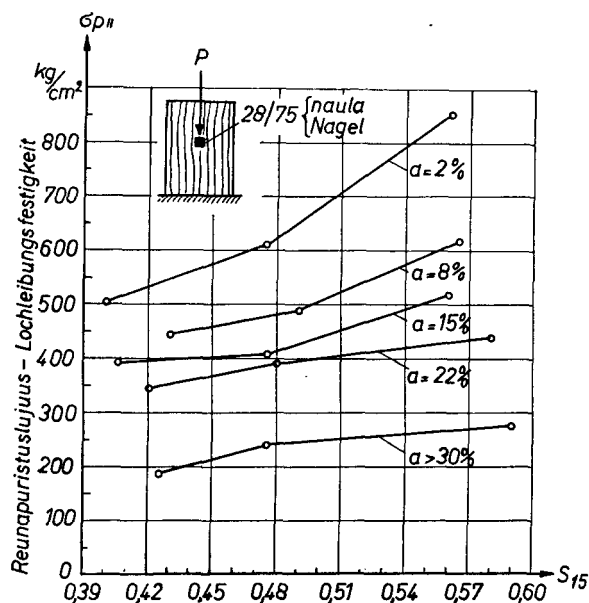


Abb. 11. Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit vom spezifischen Gewicht und Feuchtigkeitsgehalt bei Nägeln 28/75

Die grundsätzlichen Ergebnisse sind folgende:

1. Bei Zunahme von 0,01 des spezifischen Gewichtes unter Berücksichtigung von verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt ergab sich als Mittel aus 250 Versuchen eine Zunahme der Lochleibungsfestigkeit.

Feuchtigkeitsgehalt in %	1—2	8	15	22	30
Zunahme der Lochleibungsfestigkeit in kg/cm² ..	12	9,5	7	7	5

2. Die Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes bewirkt eine starke Verminderung der Lochleibungsfestigkeit (s. Abb. 12).
3. Zunehmende Nageldicke (d) vermindert die Lochleibungsfestigkeit (s. Abb. 13).
4. Die Richtung des Nagels gegenüber den Jahresringen beeinflusst nur unwesentlich die Lochleibungsfestigkeit. Bei radial zu den Jahresringen eingeschlagenen Nägeln ergibt sich ein Höchstwert der Lochleibungsfestigkeit (s. Abb. 14).

5. Geringen Einfluß auf die Lochleibungsfestigkeit übt die Krafrichtung zum Verlauf der Fasern aus. Der größte Wert der Lochleibungsfestigkeit wird bei Krafrichtung senkrecht zur Faser erreicht. Die Unterschiede in den Ergebnissen sind jedoch bei den drei verschiedenen Krafrichtungen unbedeutend (s. Abb. 15). Die Lage des Nagelquerschnittes zur Krafrichtung scheint keinen nennenswerten Einfluß zu haben.

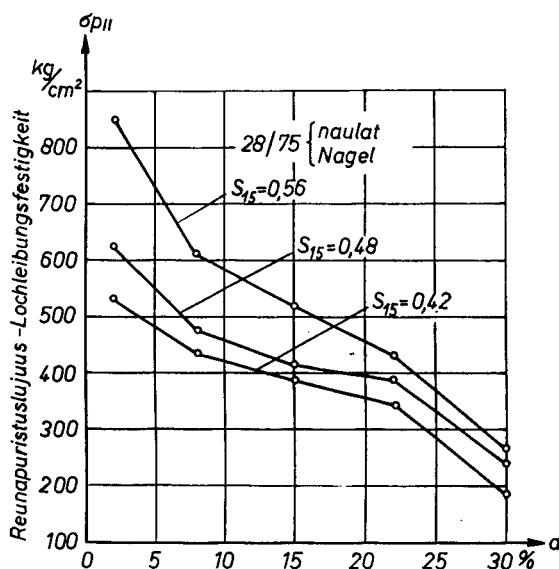


Abb. 12. Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt für Nägel 28/75 (nach Abb. 11 gezeichnet)

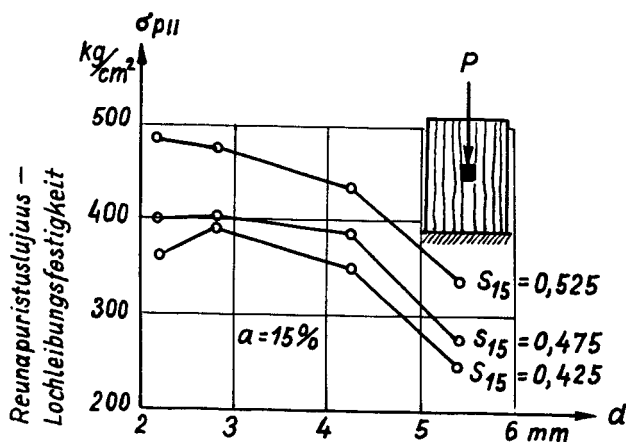


Abb. 13. Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit von der Nageldicke bei Feuchtigkeitsgehalt $a = 15\%$

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die finnischen Versuche im wesentlichen die deutschen Ergebnisse bestätigen. Wie die deutsche Fichte, so zeigt auch die finnische Kiefer keinen nennenswerten Unterschied zwischen Lochleibungsfestigkeit σ_L und Druckfestigkeit σ_B . Jedoch ist die Tendenz zu bemerken, daß die Lochleibungsfestigkeit häufig etwas höher liegt. Bei

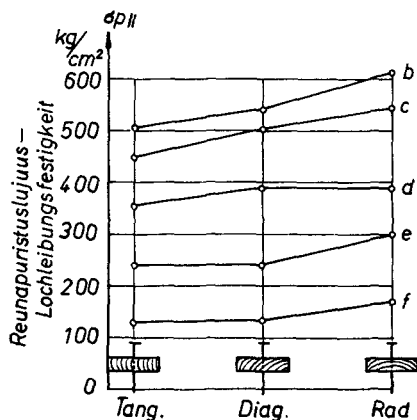


Abb. 14. Einige Vergleichskurven, die die Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit von der Richtung des Nagels gegenüber den Jahresringen zeigen

- Linie b: Nägel 28/75, schweres Holz, Feuchtigkeitsgehalt 8%
- Linie c: Nägel 42/125, schweres Holz, Feuchtigkeitsgehalt 8%
- Linie d: Nägel 42/125, leichtes Holz, Feuchtigkeitsgehalt 8%
- Linie e: Nägel 42/125, normales Holzgewicht, Feuchtigkeitsgehalt 22%
- Linie f: Nägel 28/75, leichtes Holz, Feuchtigkeitsgehalt 30%

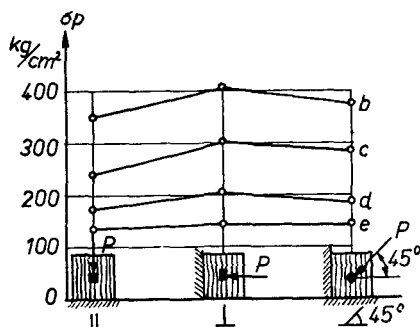


Abb. 15. Einige Vergleichskurven, die die Abhängigkeit der Spannung von der Krafttrichtung gegenüber der Faser bei einer Eindrückung von 1,5 mm zeigen

- Linie b: Nägel 21/50, radial eingeschlagen, leichtes Holz, Feuchtigkeitsgehalt 8%
- Linie c: Nägel 28/75, diagonal eingeschlagen, leichtes Holz, Feuchtigkeitsgehalt 8%
- Linie d: Nägel 42/125, tangential eingeschlagen, leichtes Holz, Feuchtigkeitsgehalt 22%
- Linie e: Nägel 55/175, radial eingeschlagen, normales Holzgewicht, Feuchtigkeitsgehalt 30%

den natürlichen Schwankungen in der Festigkeit des Holzes kann davon in der Bemessung von Anschlüssen allerdings kein Gebrauch gemacht werden.

Im übrigen erklären sich gewisse Unterschiede zwischen den deutschen und finnischen Versuchsergebnissen aus den unterschiedlichen Querschnittsformen der verwendeten Nägel.

Tafel 1

Kenn- zei- chen	Ver- such σ_B kg je mm ²	Fichte			Buche feucht (kg)	Eiche feucht (kg)	Buche trock. (kg)	Eiche trock. (kg)	Buche Sperr- holz (kg)	Austr. Black butt (kg)	Afrik. Bon- gossi (kg)
		feucht genag. feucht ab- gedr. (kg)	feucht genag. trock. ab- gedr. (kg)	trock. genag. trock. ab- gedr. (kg)							
.	69,94	1711	2638	3084	3490	3456	4410	4490	5550	3750	—
+	80,00	1791	2682	2556	3767	3441	4550	4410	5710		7910
×	92,66	1910	2262	2298	3658	3580	4510	4440	5890	4140	8180
○	131,64	1891	2992	3042	3620	3850	4560	4660	6450	4650	8610
⊕	179,90	1974	3062	3618	3370	3740	4010	4260	6020	4560	6900
Mittel $\sigma - B$ (kg je cm ²)		307	616	692	391	342	731	789	460	637	810

Tafel 2. Zusammenstellung der ermittelten Ergebnisse

1 Holzart	2 $\sigma - B$ (kg/cm ²)	3 $\sigma_{L }$ (kg/cm ²)	4 $\sigma_{L\perp}$ (kg/cm ²)	5 $\varphi_{ }$	6 φ_{\perp}
Fichte	310/590	320/615	258/526	1,03/1,04	0,83
Buche	730	811	930	1,11	1,27
Eiche	737	806	741	1,09	1,01
Buchensperrholz 9 lagig	440 1. L 480 ⊥ 1. L	1098	1090	2,40	
Austral. Blackbutt	740	1127	1391	1,52	1,88
Afrikan. Bongossi .	840	1320	1501	1,57	1,79

Literatur

Im Text wird auf das Schrifttum durch die in Klammern [] stehenden Nummern hingewiesen

- [1] C. Bach, Elastizität und Festigkeit, Berlin 1924, 9. Aufl., S. 305, Springer-Verlag.
- [2] R. Baumann, Die bisherigen Ergebnisse der Holzprüfungen in der Materialprüfungsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart, Berlin 1922.
- [3] Bruckhaus, Drahtstifte als Holzverbinder. Beitrag zur Frage der Holzverbindungen 1936.
- [4] Fahlbusch, Ein Beitrag zur Frage der Tragfähigkeit von Bolzen in Holz bei statischer Belastung. Dissertation Braunschweig 1949.
- [5] Fonrobert-Köhler, Die Haftkraft der Nägel, Bautechnik, 19 (1941).
- [6] Fonrobert-Stoy, Holznagelbau, 6. Auflage, Berlin, Wilhelm Ernst & Sohn, 1949.
- [7] Fonrobert-Stoy-Dröge, Grundzüge des Holzbaues im Hochbau (1953), S. 537.
- [8] Gaber, Statische und dynamische Versuche mit Nagelverbindungen, Karlsruhe 1935.
- [9] O. Graf, Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktionselemente, Berlin 1929.

- [10] Graf-Egner, Untersuchungen über Knotenplatten aus Sperrholz. Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein Deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein, Heft 24, 1939.
- [11] Grabbe, Die Festigkeit der zweischnittig genagelten Holzverbindungen bei gleicher und ungleicher Holzstärke. Dissertation Braunschweig 1935.
- [12] G. Janka, Centralblatt für das gesamte Forstwesen 9 (1906), S. 193, 241; 11 (1908) S. 443. Die Härte der Hölzer, Wien 1915. Mitt. Forstl. Versuchswesen Österr. H. 39. Vgl. auch Bericht IV M Bd. 2, S. 13, Nr. XXIII (1912).
- [13] Johansen, Forsøg med træforbindelser, Kopenhagen 1941.
- [14] F. Kollmann u. N. Pallay, Beiträge zur Frage der Härteprüfung von Holz. In Vorbereitung. — Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, I. F. Bergmann, München, 1951.
- [15] Fonrobert-Stoy, Le Clou dans la Construction. 2. Auflage, Paris 1951, Chr. Béranger & Co.
- [16] Marten, Über die Kraftübertragung in Nagelverbindungen. Fachausschuß für Holzfragen beim Verein Deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein, Berlin, Forschungsberichte Holz, Heft 6, 1940.
- [17] Meyer, Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung. (In Vorbereitung.)
- [18] Mlynek, Die Tragfähigkeit von Holznagelverbindungen bei Verwendung von hochwertigem Stahl. Dissertation, Braunschweig 1952.
- [19] Möller, En ny metod för Beräkning av Spikförband, Göteborg 1951.
- [20] M. Monnin, Bulletin de la Section Technique de l'Aéronautique Militaire Essais Physiques, Statiques et Dynamiques des Bois Paris, Heft 29, Juni 1919, Heft 30, Juli 1919; L'Essai des Bois. Zürich 1932, Kongreßber. Zürich IV M.
- [21] E. Mörath, Studien über die hygroskopischen Eigenschaften und die Härte der Hölzer. Darmstadt 1932, Mitt. Holzforschungsstelle Techn. Hochsch. Darmstadt, H. 1.
- [22] Preuß, Eiserne Bolzen im Holzbau. Der Holzbau 1921 und 1922.
- [23] K. Ryska, Einige Fragen aus dem Gebiete der technischen Prüfungsmethoden für Hölzer. Zürich 1932, Kongreßber. Zürich IV M.
- [24] Sattler, Hölzerne Tragwerke mit genagelten stählernen Stoßblechen, Bautechnik 25 (1948), S. 53.
- [25] R. Schlüter, Elastische Messungen an Fichtenholz (Dissertation). Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig 1932.
- [26] Seitz, Neuzeitliche Holzverbindungen. Auszugsw. Übersetzung der amerik. Schriften: Modern Connectors for Timber Konstruktion (National Committee on Wood Utilization, U. S. Dep. of Commerce; Forest Products Laboratory, Forest Service, U. S. Dep. of Agric.) und The Bearing Strength of Wood Under Bolts (U. S. Dep. of Agric., Techn. Bulletin Nr. 332). Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein Deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein, Heft 6, 1933.
- [27] Stoy, Über Versuche mit Drahtstiften als Holzverbindungsmitel. Deutsche Bauzeitschrift, Bd. 64 (1930), S. 141. — Über Versuche mit Drahtstiften als Holzverbindungsmitel, ZdVDI, 1931, Bd. 75, S. 1337, bzw. S. 273 und S. 283. — Drahtstifte als Holzverbindungsmitel. Der Deutsche Zimmermeister 1932. — Versuche mit Schraubnägeln. Der Deutsche Zimmermeister 1934. — Tragfähigkeit von Nagelverbindungen im Holzbau. Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen, Heft 11, 1935. — Tragfähigkeit von Nagelverbindungen, Schweizer Bauzeitung 1937. — Der Holzbau, 5. Auflage, 1950.
- [28] Ströer, Stand der Nagelversuche. VDI 1933.
- [29] Troche, Grundlagen für den Ingenieurholzbau. Bücher der Technik, Hannover 1951, Schrödel.
- [30] Wood Handbook. U. S. Dep. of Agriculture, Forest Products Laboratory, Washington 1935.